SOCAR Proceedings

Oil and Gas Fields Exploration, Geology and Geophysics

journal home page: <http://proceedings.socar.az>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОИСКА И РАЗВЕДКИ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ СКОПЛЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

И.Я. Чеботарева

Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Москва, Россия

Experimental Capabilities of Seismic Emission Tomography for Solving the Problems of Searching and Exploration of Deep Hydrocarbon Accumulations

I.Ya. Chebotareva

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

The standard seismic prospecting has been designed to investigate thin layering at shallow depths. At depths more than 4 km the rocks are significantly compacted, change their properties and it is often impossible to trace clear horizons by reflected waves. In the crystalline basement and lower horizons of the sedimentary cover the block structure of rocks is clearly manifested. Taking this into account geological models should be developed and other predictive indicators should be used when searching for hydrocarbon accumulations. For the study of great depths more informative seismic methods are emission and transmission tomography which have been developed in detail in seismology. This article discusses prognostic indicators different from seismic prospecting and presents experimental results confirming the success of emission tomography in their detection using the example of field studies at developed hydrocarbon deposit and other geophysical objects. The range of working depths of research covers the entire crust of the Earth including the crust-mantle transition zone.

Keywords:

Seismic emission;
Emission tomography;
Rocks;
Hydrocarbon deposits.

© 2021 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

Согласно мировой статистики 90% месторождений нефти и газа расположены на глубинах 1-3 км. Однако в современном мире наблюдается стремление к освоению все более глубоких областей, несмотря на стремительный рост сложностей и опасностей разработки [1]. Отчасти это связано с ухудшением ситуации с открытием новых месторождений нефти и газа. А отчасти, вероятно, с осознанием правоты идеи Н.А. Кудрявцева о том, что в районах, где нефть или газ имеются в каком-либо горизонте разреза, в том или ином количестве они найдутся и во всех нижележащих горизонтах, хотя бы в виде следов углеводородов [2]. В работе [3] отмечается, что «В настоящее время в интервале глубин 4500-8103 м уже разрабатывается более 1000 зарубежных месторождений нефти и газа, причем их начальные суммарные извле-

каемые запасы соответственно составляют 7% от мировых запасов нефти и 25% от запасов газа». На территории постсоветского пространства еще в 60-70-е годы прошлого века на глубинах более 4.5 км также был открыт ряд месторождений нефти и газа в Прикаспийской впадине (Тенгиз, Карачаганакское), в Предкавказье (Андреевское, Ханкальское), в Закавказье (Шах-Дениз, Бахар), в Предуральском прогибе (Акобинское), в Днепровско-Донецкой впадине (Западно-Березовское, Свиридовское) и др. По оценкам специалистов одним из препятствий к их эксплуатации оказалась низкая эффективность геологоразведочных работ.

Сейсморазведка была разработана для исследования тонкой слоистости на небольших глубинах. При ее использовании необходимыми прогностическим условием является наличие источника углеводородов, регионального флюидопора (часто представленного глинами) и характерной структуры - ловушки с коллектором внутри. Однако на больших глубинах породы существен-

E-mail: irinache@inbox.ru

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP2021SI200540>

но уплотняются. Проследить четкие горизонты по отраженным волнам часто не удается. Породы меняют свои свойства. Например, глины на глубинах более 4.5 км присутствуют в виде аргиллитов, которые легко растрескиваются и не могут служить надежными покрывками. Более надежными покрывками являются соляные породы (эвапориты) или другие плотные пластичные породы [1, 4-5]. Коллекторами на больших глубинах могут служить области тектонических нарушений, межблочные швы, зоны дилатационного разрушения [6-7]. В кристаллическом фундаменте и нижних горизонтах осадочного чехла отчетливо проявлена блоковая структура пород. С учетом этого должны разрабатываться геологические модели и необходимо использовать другие прогностические признаки при поиске глубокозалегающих скоплений углеводородов.

Метод анализа данных

Для исследования больших глубин более информативными сейсмическими методами являются эмиссионная и трансмиссионная (скоростная) томографии, детально разработанные в сейсмологии. В данной статье будут представлены результаты, полученные с использованием эмиссионной томографии. Метод, получивший со временем название эмиссионной томографии, был предложен в 1980 г. автором данной статьи с коллегами [8]. Первоначально он использовался в геофизических исследованиях, но позднее был адаптирован для работ на нефтяных месторождениях. Более подробную информацию об используемых алгоритмах и некоторых экспериментальных результатах можно найти в работах [9-14]. Источником полезной информации для сейсмической эмиссионной томографии является экстремально слабая пространственно-когерентная компонента шумоподобных сейсмических полей, которая порождена эмиссией глубинных геологических объектов. Эмиссионная томография позволяет получать трехмерные изображения глубинных активных источников и областей рассеяния сейсмических волн, оценивать частотный спектр и мощность излучения. Входными данными алгоритмов являются многоканальные записи естественного сейсмического шума Земли, кода-волны землетрясений или взрывов, а также записи техногенных помех. Техногенная помеха в некоторых случаях создает экранирующий эффект, мешающий наблюдению слабых глубинных эмиссионных источников. В этом случае ее приходится устранять специально разработанными методами подавления помех [10-11]. Но иногда техногенная помеха бывает полезной. Она создает дополнительную подсветку в среде, что позволяет выявлять слабо излучающие неоднородности, которые не выявляются по чистому сейсмическому шуму [12]. Такой пример будет показан далее в статье. Увеличение числа регистрирующих каналов повышает качество изображения и увеличивает чувствительность метода.

Например, для получения изображения трещиноватых коллекторов и разломных зон по чистому сейсмическому шуму, без дополнительной «подсветки», необходимо использовать не менее 150-200 регистрирующих датчиков. Существующие алгоритмы эмиссионной томографии обеспечивают возможность работы при разном масштабе исследований и в разной помеховой обстановке. Параметры необходимой системы наблюдений и выбор алгоритма обработки данных зависят от предполагаемых глубин исследований. Чем больше глубина, тем больший диаметр площадной расстановки и более низкочастотные регистраторы необходимо использовать.

Типы прогностических структур

При поиске и разведке месторождений глубинных углеводородов особый интерес представляют по крайней мере три типа структур:

- глубинные разломы с флюидной активностью,
- глубинные среднекоровые резервуары с каналами транспортировки флюида на верхние горизонты,
- субвертикальные зоны деструкции (геосоликоны).

Далее коротко обсудим эти три типа структур.

Глубинные разломы с флюидной активностью.

Хорошо известна приуроченность месторождений углеводородов к большим активным разломам, что связывается с вертикальной миграцией флюидов [15-16]. Вблизи разломов выявляются многопластовые месторождения и трубы дегазации, где наблюдаются высокие пластовые давления, температурные, геохимические и электрические аномалии, где по разрывным нарушениям и зонам трещиноватости происходят перетоки нефти и газа [2, 6, 16-19]. Обязательным условием продуктивности является наличие глубинной подпитки углеводородным флюидом. Пути миграции флюида проходят сначала по подводящему региональному глубинному разлому, а затем к местам аккумуляции углеводородов по распределяющей сетке разрывных нарушений, соединенной с основным разломом. Признана доминирующая роль вертикальной миграции и ограниченная роль горизонтальных перемещений углеводородов.

Среднекоровые резервуары. По данным глубинной сейсморазведки под крупными нефтяными месторождениями, например в Татарстане, выделяются образования второго типа – обширные динамические аномалии на глубинах 15-20 км, которые интерпретируются как глубинные резервуары, заполненные нефтью и соединенные транзитными каналами с месторождениями на меньших глубинах [20-21]. В процессе разработки месторождений, под действием температурного поля и деформационных процессов, подводящий канал может периодически активизироваться и пополнять ловушку новыми флюидами. По данным детального геолого-промыслового анализа

на ряде площадей Ромашкинского месторождения периодичность импульсного поступления углеводородного флюида в осадочный чехол и связь с блоково-разломной структурой фундамента Южно-Татарского свода подтверждена экспериментально [22]. Были выявлены скважины с аномально высокой накопленной добычей и растущими дебитами в период общей падающей добычи. Изменение отношений дебитов аномальных и нормальных скважин выявляет периодичность в 14-15 лет. Эта зависимость хорошо коррелируется с динамикой плотностей нефти в пьезометрических скважинах. Также обнаружены существенные геохимические отличия нефтей из аномальных скважин, являющиеся признаком современного притока углеводородов в залежь.

Субвертикальные зоны деструкции. Третий тип структур – это субвертикальные зоны деструкции. На сейсмических разрезах они проявляются как вертикальные протяженные зоны потери информации с размытым внутренним заполнением. Подобные объекты обнаружены и на месторождениях Западной Сибири, и при исследованиях Южно-Каспийского бассейна и Арктических морей России [23-27]. Диаметр структур на монтаже сейсмических записей составляет от нескольких метров на суше до нескольких километров на акваториях. Большинство исследователей считают, что образование субвертикальных зон деструкции связано с динамическими эффектами, сопровождающими импульсную инъекцию углеводородов. Результаты подробного изучения подобных объектов изложены в многочисленных работах Р.М. Бембея, С.Р. Бембея и В.М. Мегери. Ими разработан достаточно сложный механизм образования субвертикальных зон деструкции в результате периодического действия глубинного акусто-электрического импульса, порож-

дающего остро направленную ударную волну [25]. С субвертикальными зонами деструкции связывается возможность формирования жильных месторождений и образование мозаичных многоэтажных месторождений.

В следующем разделе приведены результаты полевых исследований, подтверждающие эффективность метода сейсмической эмиссионной томографии при выявлении перечисленных выше структур и мониторинге их эмиссионной динамики.

Результаты полевых исследований

Субвертикальные зоны деструкции нередко выявляются при проведении сейсморазведочных работ на месторождениях в Западной Сибири. Многоканальные записи сейсмического шума, зарегистрированные на одном из таких месторождений при непрерывной регистрации в течение нескольких дней, были обработаны с использованием алгоритмов эмиссионной сейсмической томографии. Результаты показаны на рисунке 1. До этого на месторождении проводились сейсморазведочные работы. Один из полученных сейсмических разрезов, приведенный в работе [24], показан на рисунке 1а. Он интересен тем, что там показаны две очень близко расположенные скважины, из которых только одна (левая) дала мощный устойчивый многолетний приток нефти из интервала баженовской свиты ($115.2 \text{ м}^3/\text{сутки}$). Это объясняется точным попаданием скважины в субвертикальную зону деструкции. На приведенном сейсморазведочном разрезе зона деструкции визуально ярко не выделяется вследствие малого размера изображения. Зато подобная вертикальная зона деструкции четко просматривается на сейсмоэмиссионных изображениях в южной части исследуемого объема (рис.1б). Она состоит из нескольких тонких субвертикальных каналов, питающих снизу нефтя-

Рис.1. Результаты полевых исследований на месторождении в Западной Сибири:

а – сейсмический разрез на территории исследований из работы [24, рис.19], где показаны две скважины, одна из которых попала в субвертикальную зону деструкции; б – сейсмоэмиссионные изображения субвертикальной зоны деструкции в разные моменты времени; в – изображение тектонического разлома на времени подсветки техногенной помехой; г – всплывающий эмиссионный объект; д – схема площадки наблюдений, А, Б, В – главные тектонические разломы. Ребро кубического объема 6 км

ную ловушку, вскрытую скважиной. Как видно на изображении, с течением времени интенсивность эмиссионного излучения из различных составляющих структуры изменяется. Это может быть связано с флюидной активностью и вариацией поля напряжений. На времени существования техногенной помехи четко подсветилась зона разлома (рис.1в). Разлом на изображении выглядит сложным трехмерным образованием. Здесь мы сталкиваемся с примером полезного использования техногенной помехи, создающей дополнительную подсветку для слабоизлучающих объектов. При использовании большого числа каналов (более 200) этот разлом был бы виден без дополнительной подсветки, но при небольшом числе каналов подсветка скомпенсировала недостатки системы регистрации. Изображения на рисунке 1г доказывают, что в данном разломе проявлена флюидная активность. Здесь в последовательных временных окнах изображен всплывающий флюидный объект, возможно газовый пузырь. Он «взрывается» не достигая поверхности и это событие видно на сейсмических записях как импульсный всплеск – «сейсмическое событие» с амплитудой на порядок превышающей уровень шума. На схеме площадки наблюдений (рис.1д) показаны проекции на горизонтальную плоскость субвертикальной зоны деструкции и всплывающего объекта. Как видно на рисунке флюидное образование всплывает внутри разлома, а субвертикальная зона деструкции расположена внутри целого блока и в просматриваемом диапазоне глубин с разломами не связана.

На рисунке 2 показаны результаты полевых исследований с использованием поверхностной системы регистрации, состоящей из 300 вертикальных датчиков. В данном эксперименте исследовались сравнительно небольшие глубины – 0.5-3.5 км. Однако этот пример интересен

тем, что число регистрирующих каналов оказалось достаточным, чтобы четко визуализировать область природной трещиноватости, и чтобы появилась возможность проследить пространственную активизацию эмиссионной активности при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород. Анализ результатов показывает, что в разных частотных диапазонах просматриваются разные детали деформационного процесса. В нижнем частотном диапазоне визуализируются микроземлетрясения (рис.2 б3, рис.2 в3). При проведении гидравлического разрыва изображения в двух верхних диапазонах частот существенно различаются (рис.2б1-б2, рис.2в1-в2). В среднем диапазоне визуализируется эмиссионная активизация зоны трещиноватости. В верхнем диапазоне частот визуализируются процессы подготовки разрушения пород. В верхнем диапазоне частот на времени роста давления эмиссия локализуется по границам неустойчивого блока (рис.2б1). Вследствие подвижки блока у его основания происходит достаточно сильное сдвоенное микроземлетрясение (рис.2б3). Оно инициировано гидроразрывом, но к трещине гидроразрыва отношения не имеет и расположено на расстоянии более 2 км от зоны перфорации. После сброса давления, на времени релаксации среды в нижнем частотном диапазоне продолжают визуализироваться микроземлетрясения. В среднем диапазоне виден процесс релаксации в области трещиноватости. На начальном этапе релаксации эмиссионное излучение в высокочастотном диапазоне исчезает, распределение интенсивности в изображении становится равномерным с точностью до статистического разброса. При проведении работ с существенной техногенной нагрузкой на среду необходимо различать два состояния – фоновое состояние пород и состояние на времени техно-

Рис.2. Эмиссионная реакция горных пород на внешнее воздействие в разных частотных диапазонах: распределение эмиссионных источников при фоновом воздействии на исследуемый объем до (а1-а2) и после (г1-г2) проведения гидроразрыва; активизация эмиссионных источников на времени подъема давления (б1-б3) и сразу после сброса давления (в1-в2). Ребро кубического объема 3 км. Полный частотный диапазон исследований составляет 10-100 Гц. Частотный диапазон изображений уменьшается сверху вниз

генного внешнего воздействия. В фоновом состоянии выделенный объем среды также испытывает некоторое внешнее воздействие. Это постоянно действующие приливные и тектонические деформации с фоновыми амплитудами и набором частот. Горные породы в геологическом времени приспособляются к такому воздействию. Энергия внешней нагрузки частично сбрасывается внутри объема через области природной трещиноватости и разрывных нарушений, в которых локализуется наибольшая фоновая активность деформационных процессов. На рисунках 2а и 2г показаны фоновые распределения эмиссионных источников до гидроразрыва и через некоторое время после окончания работ, когда произошла релаксации состояния среды. Видно, что распределение эмиссионных источников одинаково в среднем и верхнем диапазоне частот и достаточно быстро возвращается к невозмущенному фоновому состоянию. То есть из экспериментальных результатов следует, что энергия фоновой эмиссии равномерно распределяется по частоте (внутри определенного диапазона) и фоновое пространственное распределение эмиссионных источников весьма устойчиво по отношению к техногенному воздействию. Искривленное распределение возвращается к фоновому до воздействия за счет устойчивости существующей системы межмасштабных связей блоковой геологической среды, стабилизирующих воздействие фоновых геофизических полей за счет энергии естественного сейсмического фона Земли.

Далее будут показаны два геофизических результата, полученные не на месторождениях углеводородов, но являющиеся примером локализации экстремально глубоких геофизических объектов. На рисунке 3 показана зона эмиссионной активности, выявленная на территории вулканического фронта на о.Хонсю в Японии. На горизонтальных срезах трехмерных сейсмо-

эмиссионных изображений видно, что активная область имеет сложную структуру и четко просматривается по эмиссионному излучению на глубинах 4-15 км. Получить изображение на больших глубинах не позволили параметры системы наблюдений. Японскими геофизиками показано, что эта зона является низкоскоростной аномалией и областью повышенного затухания. Здесь же располагается кластер наиболее сильных древних и современных землетрясений. Также известно, что этот участок земной коры испытывает деформации сжатия. Выявленные особенности эмиссионной аномалии свидетельствуют о том, что для нее характерны повышенная раздробленность и трещиноватость. Вероятно, эта аномалия является областью дилатансионного разрушения пород. Примерно так при использовании эмиссионной томографии должны выглядеть «резервуары подпитки под крупными нефтяными месторождениями», которые выявлены на территории Татарстана и о которых говорилось ранее.

Эмиссионная томография при использовании современного сейсмологического оборудования позволяет изучать эмиссионную активность не только в верхней и средней части коры Земли, но просматривать и глубинные корни разломов. На рисунке 4 показаны результаты сейсмологических исследований переходной зоны кора-мантия в Киргизии, в район предполагаемого внедрения в кору горячих мантийных потоков, связанных с ответвлением Тибетского мантийного плюма [29-31]. Здесь же располагается несколько крупных региональных разломов. При исследованиях были использованы записи сети широкополосных сейсмических станций KNET. Переходной зоне кора-мантия в районе исследований соответствуют глубины 50-90 км [32]. Как видно на рисунке 4, по трансмиссионной (скоростной) томографии в исследуемом объеме выявляется разуплотненная низкоскоростная зона на коро-

Рис.3. Результаты исследований в районе вулканического фронта на о.Хонсю, Япония: горизонтальные срезы сейсмоэмиссионных 3-D изображений на глубинах 0-15 км (слева); схема района исследований (справа), на которой показано полностью положение эмиссионного кластера на глубине 11 км. Штриховая линия оконтуривает положение низкоскоростной аномалии и области повышенного затухания (по материалам работы [28]), звездочки помечают положение эпицентров сильных ($M=5-7$) исторических и современных землетрясений

во-мантийной границе и несколько аномалий на других глубинах [29]. Эмиссионная сейсмическая томография помогла детализировать структуру разуплотнения в переходной зоне и показать, что она является кольцевой системой высокопроницаемых каналов (рис.4). При расчете сейсмоэмиссионных изображений был использован специально разработанный алгоритм с повышенной устойчивостью к возмущению волнового фронта за счет рассеяния сейсмического сигнала на случайных неоднородностях среды. Эффективность алгоритма была проверена на локализации источников сигналов от глубоких землетрясений [33]. Как видно на горизонтальных срезах сейсмоэмиссионных изображений на рисунке 4, на глубине 50-90 км в центре срезов четко проявляется кольцевая структура узких вертикально вытянутых неоднородностей-каналов. На меньших

и больших глубинах изображение центральной структуры размывается. На глубинах менее 50 км преобладают узкие горизонтально протяженные неоднородности, которые могут быть интерпретированы как элементы региональных тектонических нарушений [33]. Анализ короткопериодных сейсмических волн в районе исследований, сделанный в работе [34] показывает, что перед сильными землетрясениями в нижней коре и верхней мантии формируются области повышенного поглощения поперечных волн и возникают существенные временные вариации структуры поля поглощения. В работе [34] это объясняется активной миграцией ювениального флюида. Это является дополнительным подтверждением наличия высокопроницаемых каналов, являющихся путями транспортировки водно-газовых флюидов, и мантийных корней разломов.

Выводы

Приведенные выше результаты подтверждают, что сейсмическая эмиссионная томография позволяет выявлять и визуализировать по эмиссионному и рассеянному излучению различные локализованные геологические объекты, в том числе принципиально не видимые или трудно выделяемые для сейсморазведки. Это, например, тонкие вертикальные неоднородности, области проявления фрикционных эффектов и других эмиссионных механизмов. Эмиссионная томография высокоэффективна при локализации прогностических структур глубокозалегающих месторождений УВ, которые обсуждались выше. Как показывает опыт геофизических исследований, существующие алгоритмы и современная регистрирующая аппаратура позволяют в большом диапазоне глубин четко выявлять трещиноватые коллекторы, тектонические нарушения, вертикальные зоны деструкции, области концентрации напряжений и флюидной активности. Ограничения по глубине в пределах коры отсутствуют.

С использованием уже имеющихся алгоритмов и методик можно разрабатывать технологии для решения задач поиска и разведки глубокозалегающих скоплений углеводородов, а также для повышения нефтеотдачи на разрабатываемых месторождениях. На истощенных месторождениях эмиссионная томография обеспечит возможность выявления каналов глубинной подпитки с нарушенной проницаемостью. Бурение в канал ниже пробки позволит получать углеводороды прямо из нефтеподводящего канала [35]. На территории месторождений, где обнаружены скважины с большим постоянным притоком углеводородов, перспективны работы по выявлению пропущенных каналов подпитки с необнаруженными

ловушками при вершине.

Как упоминалось выше, техногенные процессы могут существенно менять напряженно-деформированное состояние среды и быть триггерами динамических явлений. Области концентрации напряжений и «ослабленные» зоны тектонических нарушений проявляются как эмиссионные кластеры даже в фоновом состоянии и могут быть обнаружены задолго до наступления геофизической катастрофы. Техногенное воздействие часто создает полезную дополнительную подсветку пород и обеспечивает возможность выделять по рассеянному излучению объекты со слабыми эмиссионными свойствами. Например, при бурении сверхглубоких скважин эмиссионная томография позволит детально исследовать прилегающую область пород в радиусе нескольких километров. Как показывают результаты полевых работ, приведенные на рисунке 1, небольшое по мощности приповерхностное техногенное воздействие способно проникать до глубины не менее 6-10 км и высвечивать все детали тектонического разлома. Это связано с тем, что тело разлома со всеми ответвлениями является волноводом сложной формы. При использовании эмиссионной томографии разлом визуализируется за счет сейсмического излучения, которое просачивается через стенки несовершенного волновода, но основная доля энергии остается внутри волновода. Этот результат с одной стороны говорит о возможности визуализации всех связей разлома с залежами углеводородов, с другой стороны о потенциальной возможности воздействия на глубинные резервуары поверхностными источниками с визуальным контролем этого воздействия.

Литература

1. Беленицкая, Г. А. (2011). Мексиканский залив - центр природных и геотехногенных нефтяных катастроф. *Региональная геология и металлогения*, 45, 51-68.
2. Кудрявцев, Н. А. (1973). Генезис нефти и газа. *Ленинград: Недра*.
3. Гулиев, И. С., Керимов, В. Ю. (2012). Сверхглубокие углеводородные системы и технологии их прогноза. *Основы технологии поисков и разведки нефти и газа*, 1, 24-32.
4. Овчаренко, А. В., Ермаков, Б. В., Мятчин, К. М. и др. (2007). Флюидоупоры в месторождениях углеводородов. *Литоология и полезные ископаемые*, 2, 201-213.
5. Коротков, С. Б., Карнаухов, С. М., Ступакова, А. В. и др. (2019, май). Прогноз ареала распространения соленосных толщ шельфа арктических морей России на основе геологических и океанографических данных. *Материалы конференции «Новые Идеи в Геологии Нефти и Газа-2019»*. Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова.
6. Молодцов, И. В., Мавричев, В. Г., Баранов, В. Н. (2016). Возможности выделения разуплотненных зон в породах кристаллического фундамента Южно-Татарского свода, перспективных на обнаружение углеводородов. *Металлогения*, 66, 95-201.
7. Коротков, С. Б. (2011). Новые прогнозно-поисковые геологические модели для геофизических методов разведки. *Вести газовой науки*, 3(8), 131-136.
8. Николаев, А. В., Троицкий, П. А., Чеботарева, И. Я. (1983). Способ сейсмической разведки. *Авторское свидетельство СССР 3213796*.
9. Tchebotareva, I. I., Nikolaev, A. V., Sato, H. (2000). Seismic emission activity of Earth's Crust in Northern Kanto, Japan. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 120(3), 167-182.
10. Чеботарева, И. Я. (2010). Новые алгоритмы эмиссионной томографии для пассивного сейсмического мониторинга разрабатываемых месторождений углеводородов. Часть I. Алгоритмы обработки и численное моделирование. *Физика Земли*, 3, 7-36.
11. Чеботарева, И. Я. (2011). Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума. *Акустический журнал*, 57 (6), 844-853.
12. Chebotareva, I. Ya. (2018). Ray tracing methods in seismic emission tomography. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 54(2), 201-213.
13. Чеботарева, И. Я. (2018). Эмиссионная сейсмическая томография – инструмент для изучения трещиноватости и флюидодинамики земной коры. *Георесурсы*, 20(3), 238-245.
14. Чеботарева, И. Я., Дмитриевский, А. Н. (2020). Диссипативная сейсмика. *Физическая мезомеханика*, 23(1), 14-32.
15. Кропоткин, П. Н. (1955). Проблема происхождения нефти. *Советская геология*, 47, 104-125.
16. Валяев, Б. М. (2011). Углеводородная дегазация Земли, геотектоника и происхождение нефти и газа. *Материалы конференции, посвященной 100-летию со дня рождения П.Н. Кропоткина «Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений»*. Москва: ГЕОС.
17. Напеев, Д. В., Оленченко, В. В. (2010). Комплексирование геофизических и геохимических методов при поиске залежей углеводородов в Усть-Тымском нефтегазоносном районе. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 5(1).

18. Pirson, S. J. (1981). Significant advances in magneto-electric exploration. Unconventional Methods in Exploration for Petroleum and Natural Gas. Proc. Symposium, II-1979 /Gottlieb, B.M. (Ed.). Dallas, Texas: Southern Methodist University Press.
19. Муслимов, Р. Х. (2019). Роль кристаллического фундамента в формировании ресурсной базы углеводородов республики татарстан. *Материалы Международной научно-практической конференции «Углеводородный и минерально-сырьевой потенциал кристаллического фундамента»*. Казань: ИХЛАС.
20. Трофимов, В. А. (2000). Региональные геофизические исследования в Татарстане: комплекс, основные результаты и новые задачи. *Геоинформатика*, 4, 48-51.
21. Трофимов, В. А. (2014). Глубинные региональные сейсморазведочные исследования МОГТ нефтегазоносных территорий. *Москва: ГЕОС*.
22. Муслимов, Р. Х., Плотникова, И. Н. (2018). Учёт процессов переформирования нефтяных залежей при длительной эксплуатации и глубинной подпитки при моделировании разработки нефтяных месторождений. *Георесурсы*, 3(20), 186-192.
23. Бембель, Р. М., Бембель, С. Р., Мегеря, В. М. (2003). Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. *Тюмень: Вектор Бук*.
24. Мегеря, В. М. (2009). Поиск и разведка залежей углеводородов, контролируемых углеводородной дегазацией земли. *Москва: Локус Станди*.
25. Бембель, Р. М., Бембель, С. Р., Мегеря, В. М. (2001). Геосолитонная природа субвертикальных зон деструкции. *Геофизика. Специальный выпуск к 50-летию «Хантымансийсктеофизика»*, 36-50.
26. Мамедов, П. З., Гулиев, И. С. (2003). Субвертикальные геологические тела в осадочном чехле южно-каспийской впадины. *Известия НАН Азербайджана. «Науки о Земле»*, 3, 139-146.
27. Гулиев, И. С. (2006). Субвертикальные геологические тела. Механизмы формирования и углеводородный потенциал. Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа. Актуальные проблемы геологии и геохимии нефти и газа. *Москва: ГЕОС*.
28. Matsumoto, S., Hasegawa, A. (1996). Distinct S wave reflector in midcrust beneath the Nikko-Shirane Volcano in the northeastern Japan arc. *Journal of Geophysical Research*, 101(2), 3067-3083.
29. Усольцева, О. А., Санина, И. А. (2006). Модели для непрерывной среды с В-сплайн аппроксимацией (алгоритмы разработаны в ИДГ РАН). Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. *Бишкек-Илим: МНТЦ*.
30. Kosarev, G. L., Petersen, N. V., Vinnik, L. P., Roecker, S. W. (1993). Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: contrasts in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault. *Journal of Geophysical Research*, 98, 4437-4448.
31. Makeeva, L. I., Vinnik, L. P., Roecker, S. W. (1992). Shear-wave splitting and small-scale convection in the continental upper mantle. *Nature*, 358, 144-147.
32. Беляевский, Н. А. (1974). Земная кора в пределах территории СССР. *Москва: Недра*.
33. Чеботарева, И. Я. (2011). Алгоритм сейсмической эмиссионной томографии при ослаблении пространственной корреляции сигнала. *Вестник МГОУ. Естественные науки*, 1, 101-107.
34. Копничев, Ю. Ф., Соколова, И. Н. (2010). Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в литосфере Тянь-Шаня и Джунгарии и их связь с сейсмичностью. *Доклады РАН*, 433(6), 808-812.
35. Трофимов, В. А. (2013). Кардинальное решение вопроса повышения нефтеотдачи «старых» месторождений – добыча нефти непосредственно из нефтеподводящих каналов. *Георесурсы*, 4(54), с. 65-68.

References

1. Belenickaya, G. A. (2011). Meksikanskij zaliv - centr prirodnih i geotekhnogennyh neftyanyh katastrof. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, 45, 51-68.
2. Kudryavtsev, N. A. (1973). Genesis of petroleum and gas. *Leningrad: Nedra*.
3. Guliev, I. S., Kerimov, V. YU. (2012). Sverhglubokie uglevodorodnye sistemy i tekhnologii ih prognoza. *Osnovy tekhnologii poiskov i razvedki nefiti i gaza*, 1, 24-32.
4. Ovcharenko, A. V., Ermakov, B. V., Myatchin, K. M., Shlezinger, A. E. (2007). Caprocks In Hydrocarbon Fields. *Lithology and Mineral Resources*, 42(2), 180-191.
5. Korotkov, S. B., Karnauhov, S. M., Stupakova, A. V. i dr. (2019, maj). Prognoz areala rasprostraneniya solenosnyh tolshch shel'fa arkticheskikh morej rossii na osnove geologicheskikh i okeanograficheskikh dannyh. *Materialy konferencii «Novye Idei v Geologii Nefiti i Gaza-2019»*. *Moskva: MGU imeni M.V. Lomonosova*.
6. Molodtsov, I. V., Mavrichiev, V. G., Baranov, V. N. (2016). Possibility to distinguish decompressed zones in the crystalline basement rocks of the South Tatar Arch promising for hydrocarbon discovery. *Regional Geology and Metallogeny*, 66, 95-102
7. Korotkov, S. B. (2011). Novye prognoznno-poiskovye geologicheskie modeli dlya geofizicheskikh metodov razvedki. *Vesti gazovoj nauki*, 3(8), 131-136.
8. Nikolaev, A. V., Troickij, P. A., Chebotareva, I. Ya. (1983). Sposob sejsmicheskoy razvedki. *Avtorskoe svidetel'stvo SSSR* 3213796.

9. Tchebotareva, I. I., Nikolaev, A. V., Sato, H. (2000). Seismic emission activity of Earth's Crust in Northern Kanto, Japan. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 120(3), 167–182.
10. Chebotareva, I. Y. (2010). New algorithms of emission tomography for passive seismic monitoring of a producing hydrocarbon deposit: part i. algorithms of processing and numerical simulation. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 46(3), 187-198.
11. Chebotareva, I. Ya. (2011). Methods for passive study of the geological environment using seismic noise. *Acoustical Physics*, 57(6), 857-865.
12. Chebotareva, I. Ya. (2018). Ray tracing methods in seismic emission tomography. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 54(2), 201-213.
13. Chebotareva, I. Ya. (2018). Emission seismic tomography – the tool to study fracturing and fluidodynamics of the Earth crust. *Georesources*, 20(3), 238-245.
14. Chebotareva, I. Ya., Dmitrievskiy, A.N. (2020). Dissipative seismicity. *Fizicheskaya Mezomekhanika*, 23(1), 14-32.
15. Kropotkin, P. N. (1955). Problema proiskhozhdeniya nefi. *Sovetskaya geologiya*, 47, 104-125.
16. Valyaev, B. M. (2011). Uglevodorodnaya degazatsiya Zemli, geotektonika i proiskhozhdenie nefi i gaza. *Materialy konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya P.N. Kropotkina «Degazatsiya Zemli i genezis neftegazovykh mestorozhdenij»*. Moskva: GEOS.
17. Napreev, D. V., Olenchenko, V. V. (2010). Complex application of geophysical and geochemical methods in searching hydrocarbon pools in the Ust-Tym petroleum district. *Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*, 5(1).
18. Pirson, S. J. (1981). Significant advances in magneto-electric exploration. Unconventional Methods in Exploration for Petroleum and Natural Gas. Proc. Symposium, II-1979 /Gottlieb, B.M. (Ed.). Dallas, Texas: Southern Methodist University Press.
19. Muslimov, R. H. (2019). Rol' kristallicheskogo fundamenta v formirovanii resursnoj bazy uglevodorodov respubliki tatarstan. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Uglevodorodnyj i mineral'no-syr'evyj potencial kristallicheskogo fundamenta»*. Kazan': Ihlas.
20. Trofimov, V. A. (2000). Regional'nye geofizicheskie issledovaniya v Tatarstane: kompleks, osnovnye rezul'taty i novye zadachi. *Geoinformatika*, 4, 48-51.
21. Trofimov, V. A. (2014). Glubinnye regional'nye sejsmorazvedochnye issledovaniya MOGT neftegazonosnykh territorij. Moskva: GEOS.
22. Muslimov, R. Kh., Plotnikova, I. N. (2018). Consideration of the processes of oil deposit reformation during long-term operation and deep feeding in modeling the development of oil fields. *Georesursy*, 3(20), 186-192.
23. Bembel', R. M., Bembel', S. R., Megerya, V. M. (2003). Geosolitony: funktsional'naya sistema Zemli, koncepciya razvedki i razrabotki mestorozhdenij uglevodorodov. Tyumen': Vektor Buk.
24. Megerya, V. M. (2009). Poisk i razvedka zalezhej uglevodorodov, kontroliruemykh uglevodorodnoj degazatsiej zemli. Moskva: Lokus Standi.
25. Bembel', R. M., Bembel', S. R., Megerya, V. M. (2001). Geosolitonnaya priroda subvertikal'nykh zon destrukcii. *Geofizika. Special'nyj vypusk k 50-letiyu «Hantymansijskteofizika»*, 36-50.
26. Mamedov, P. Z., Guliev, I. S. (2003). Subvertikal'nye geologicheskie tela v osadochnom chekhle yuzhno-kaspijskoj vpadiny. *Izvestiya NAN Azerbajdzhana. «Nauki o Zemle»*, 3, 139-146.
27. Guliev, I. S. (2006). Subvertikal'nye geologicheskie tela. Mekhanizmy formirovaniya i uglevodorodnyj potencial. Novye idei v geologii i geohimii nefi i gaza. Aktual'nye problemy geologii i geohimii nefi i gaza. Moskva: GEOS.
28. Matsumoto, S., Hasegawa, A. (1996). Distinct S wave reflector in midcrust beneath Nikko-Shirane Volcano in the northeastern Japan arc. *Journal of Geophysical Research*, 101(2), 3067-3083.
29. Usol'ceva, O. A., Sanina, I. A. (2006). Modeli dlya nepreryvnoj sredy s V-splajn approksimatsiej (algoritmy razrabotany v IDG RAN). Zemnaya kora i verhnaya mantiya Tyan'-SHanya v svyazi s geodinamikoj i sejsmichnost'yu. Bishkek-Ilim: MNTC.
30. Kosarev, G. L., Petersen, N. V., Vinnik, L. P., Roecker, S. W. (1993). Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: contrasts in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault. *Journal of Geophysical Research*, 98, 4437-4448.
31. Makeeva, L. I., Vinnik, L. P., Roecker, S. W. (1992). Shear-wave splitting and small-scale convection in the continental upper mantle. *Nature*, 358, 144-147.
32. Belyaevskij, N. A. (1974). Zemnaya kora v predelakh territorii SSSR. Moskva: Nedra.
33. Chebotareva, I. Ya. (2011). Algorithm of seismic emission tomography in weak signal correlation presence. *Bulletin of Moscow State Regional University*, 1, 101–107.
34. Kopnichen, Y. F., Sokolova, I. N. (2010). Heterogeneities in the absorption field of short-period s waves in the lithosphere of tien shan and dzungaria with their relation to seismicity. *Doklady Earth Sciences*, 433(2), 1119-1123.
35. Trofimov, V. A. (2013). Comprehensive solution of the enhanced oil recovery issue of "old" fields - oil production directly from the oil-bearing channels. *Georesources*, 4(54), c. 65-68.

Экспериментальные возможности сейсмической эмиссионной томографии для решения задач поиска и разведки глубокозалегающих скоплений углеводородов

И.Я. Чеботарева

Институт проблем нефти и газа
Российской академии наук, Москва, Россия

Реферат

Стандартная сейсморазведка была разработана для исследования тонкой слоистости на небольших глубинах. На глубинах более 4 км породы существенно уплотняются, меняют свои свойства и проследить четкие горизонты по отраженным волнам часто не удается. В кристаллическом фундаменте и нижних горизонтах осадочного чехла отчетливо проявляется блоковая структура пород. С учетом этого должны разрабатываться геологические модели, также необходимо использовать другие прогностические признаки при поиске скоплений углеводородов. Для исследования больших глубин более информативными сейсмическими методами являются эмиссионная и трансмиссионная томографии, детально разработанные в сейсмологии. В данной статье рассмотрены отличные от сейсморазведочных прогностические признаки и представлены экспериментальные результаты, подтверждающие успешность эмиссионной томографии при их выявлении на примере полевых исследований на разрабатываемых месторождениях и других геофизических объектах. Диапазон рабочих глубин исследований охватывает всю кору Земли, включая переходную зону кора-мантия.

Ключевые слова: сейсмическая эмиссия; эмиссионная томография; горные породы; месторождения углеводородов.

Dərinədə yatan karbohidrogen yığımlarının axtarışı və kəşfiyyatı məsələlərinin həlli üçün seysmik emissiya tomoqrafiyasının eksperimental imkanları

İ.Ya. Çebotareva

Rusiya Elmlər Akademiyasının
Neft və Qaz Problemləri İnstitutu, Moskva, Rusiya

Xülasə

Standart seysmik kəşfiyyat kiçik dərinliklərdə nazik təbəqələrin tədqiqi üçün işlənmişdir. 4 km-dən artıq dərinliklərdə süxurlar əhəmiyyətli dərəcədə sıxlaşır, öz xassələrini dəyişir və əks olunan dalğalarla dəqiq horizonları izləmək çox vaxt mümkün olmur. Çöküntü örtüyünün kristal fundamentində və aşağı horizonlarında süxurların blok quruluşu aydın şəkildə özünü göstərir. Bunu nəzərə alaraq geoloji modellər işlənməli, həmçinin karbohidrogen yığımlarının axtarışı zamanı digər proqnozlaşdırıcı əlamətlərdən istifadə edilməlidir. Böyük dərinliklərin tədqiqi üçün daha informativ seysmik üsullar seysmologiyada ətraflı işlənmiş emissiya və transmissiya tomoqrafiyasıdır. Bu məqalədə seysmik kəşfiyyatdan fərqli proqnostik əlamətlərə baxılmış və işlənən yataqlarda və digər geofiziki obyektlərdə aparılan sahə tədqiqatları nümunəsində onların müəyyənləşdirilməsi zamanı emissiya tomoqrafiyasının müvəffəqiyyətliyini təsdiqləyən eksperimental nəticələr təqdim olunmuşdur. Tədqiqatın işçi dərinliklərinin diapazonu yer qabığının mantiyaya keçid zonası da daxil olmaqla bütün yer qabığını əhatə edir.

Açar sözlər: seysmik emissiya; emissiya tomoqrafiyası; dağ-mədən süxurları; karbohidrogen yataqları.